

Risikoen ved kjernekraft

Til kjernekraftutvalget

Det er etter vårt syn nødvendig å klargjøre enkelte påstander i media om at kjernekraft kan løse Norges energiutfordringer i nær framtid praktisk talt uten ulemper. Mange innspill kommer fra personer med bakgrunn i foretaket "Norsk kjernekraft AS" og organisasjonen "Norske kjernekraftkommuner". Men de kommer også fra lokale politikere og fra politiske partier. Tilogmed i miljøbevegelsen har flere tatt til orde for kjernekraft.

Det ikke merkelig at kjernekraft kommer opp igjen og igjen, når vindmøller på land og til sjøs utfordrer lokale næringer, maktforhold og miljøinteresser. Felles for slike innspill er at de nærmest tegner et drømmebilde av kjernekraftas fordeler, mens de ser bort fra ulempene og farene ved denne teknologien. Vi ønsker å gjøre oppmerksom på at mens denne kampanjen pågår i Norge, er kjernekraftbasert strømproduksjon nedadgående i alle land unntatt Russland og kanskje i Kina. Det kan altså se ut som at kjernekraftepoken går nedover globalt, noe disse innleggene underslår.

Vi mener at det fortsatt er gode grunner til å si nei til kjernekraft i Norge, ut fra hvilke negative følger kjernekraft vil kunne få for miljøet, hvilke behov samfunnet har for kraft, situasjonen i industrien og faren for spaltbart materiale som kan brukes til kjernevåpen. Og ganske avgjørende mener vi at kjernekraft fortsatt vil være håpløst mye dyrere enn alternativene, mer tidkrevende å få stand og mindre fleksibel i drift. Foreløpig har ingen funnet noen løsning på disse ulempene. Derfor er det merkelig at kjernekraft stadig får så mye positiv omtale i media.

En viktig kilde er den årlige *World Nuclear Industry Status Report*, som er basert på omfattende innhenting av empiri fra hele verden. I september kom 2024-utgaven av rapporten, hvilket gjør det mulig å bringe disse oppdaterte kunnskapene.ⁱ Opplysningene vi bringer her er hentet fra denne rapporten om ikke annet er spesielt opplyst.

Dessuten ønsker vi å sette fokuset på noen mer prinsipielle aspekter av problemet, som vi mener bør veie tungt når Kjernekraftutvalget behandler spørsmålet.ⁱⁱ

En epoke på hell

Mye tyder på at kjernekrafta slik vi er blitt kjent med den, er på hell i verden. Mens miljøkrisa på 1990-tallet så ut til å peke på kjernekraft som en endelig løsning, har utviklingen de siste åra vist at den er i ferd med å bli utkonkurrert av andre energiformer, særlig solar og vind.

Men verden må forholde seg til det som er bygd. Man står overfor en formidabel oppgave i å sikre at de 412 kjernekraftreaktorene fordelt på 190 kjernekraftverk som finnes rundt omkring blir drevet forsvarlig i de 15-20 åra som de har igjen av levetida.ⁱⁱⁱ Disse reaktorene har en gjennomsnittlig levetid på 32,2 år og produserer 9,1 % av verdens strømforbruk. Problemet for bransjen er at over hundre reaktorer snart må stenges uten at nye kommer til i samme omfang. Noen satser på å forlenge levetida, slik også Sverige delvis gjør. Det er et tvilsomt sjansespill med sikkerheten. Om 15 til 20 år vil kjernekraftepoken slik vi kjenner den derfor trolig gå mot slutten.

Fram til begynnelsen av 2000-tallet var kjernekraften på offensiven, med 1985 som det store satsingsåret. Etter hvert ble det stadig flere reaktorer. I 2002 var tallet 438. På tross av at strømkapasiteten i 2024 økte til 367,3 GW, litt mer enn rekordåret i 2006, så har begrensningene til denne energiformen blitt mer tydelige. Problemene med deponering av brukt brensel som man hadde forventet at kunne bli løst, er fortsatt uløste. Svære prosjekter med kostbare lagergruver er under utprøving i Finland og Frankrike. Men de fleste andre steder har slik anlegg blitt stengt, eller ikke kommet lengre enn til planleggingsstadiet. I stedet er normalen blitt at brukt uranbrensel lagres på reaktoranleggene verden over, ikke bare i India og Russland. Offentligheten har etter hvert innsett hvor vanskelig det blir med stadig større mengder av dette avfallet i hundretusenvis av år. Om lag en tredjedel av alle anlegg som har produsert strøm på et tidspunkt - 210 reaktorer - er nedstengt og lagt i "møllposen", uten at man helt vet hva man skal gjøre med dem. Bygningene og

reaktorkonstruksjonene blir bare stående. I mens blir anleggsområdene deres forvandlet til lagerplasser for brukt atombrensel.

Status

Kjernekraftanleggene har gjerne blitt markedsført som uendelighetsmaskiner, som produserer stabil kraft uavhengig av alle ytre forhold i år etter år, nærmest av seg selv. Men dette er langt fra tilfellet. Omtrent 1/3 av reaktorkjernen må normalt skiftes ut per år. For en standard 1 GW- reaktor utgjør det gjerne 25 – 30 tonn brensel, hvorav rundt én prosent er plutonium. En standard reaktor av generasjon II har gjerne en konsesjonstid på 20-40 år og en levetid på ca. 30 år. Nå satser mange på å forlenge levetida til 40 og 50 år. Uansett, når levetida er oppnådd, er reaktoren oppbrukt og må "dekommisjoneres" som det heter, det vil si kobles fra strømmettet, plukkes fra hverandre og uranbrenselet lagres som høyradioaktivt avfall i mange, mange år, mens det kjøles i egne basseng og senere tørrlagres. Ideelt sett skulle det altså ryddes opp etter en slik gammel reaktor. Men det er ikke det som skjer. Også deler av reaktorkonstruksjonen er svært radioaktivt i mange år og blir gjerne stående. Slik tilfellet er med restene av de tre gamle reaktorene på Kjeller og Halden-reaktoren.

I tillegg til problemene som følge av levealdersbegrensninger, har faren for utslipp ved uhell eller andre uforutsette hendinger kommet mye mer i fokus i Vesten etter katastrofen i Fukushima i 2011. Det har vist seg langt mer krevende å holde disse reaktorene gående uten flere katastrofer eller nesten-katastrofer, enn man tidligere la til grunn. Sannheten er at det har vært langt flere problemer av denne typen enn de fleste aner. Dette gjelder i USA som pr. juli 2024 hadde 94 reaktorer i drift, det største antallet av noe land. USAs reaktorer er nå i ferd med å bli svært gamle.

Det gjelder også Frankrike med 56 reaktorer i drift. I 2021-22 fant man sprekker i vitale konstruksjoner, hvilket ledet til nedstengning av de fire mest moderne reaktorene, og deretter et fullstendig inspeksjonsprogram og omfattende reparasjoner som ennå ikke er sluttført. Som følge av dette sank strømproduksjonen i landet med 120 TWh i 2022. Nå har man lansert en plan for seks nye enheter fram til 2040. På tross av at ingen ny reaktor har vært startet siden 1999, har Frankrike klart å holde sin reaktorflåte på om lag 56 enheter i gang, men har ikke klart å holde strømproduksjonen i nærheten av rekordnivået fra 2005 på 78,3% av totalproduksjonen. Ved utløpet av 2024 utgjør kjernekraften 65% av totalproduksjonen. Antall dager med ikke-planlagt driftsstans har øket siden 2019. Dessuten har president Macron bestemt at to reaktorer skal overføres til militær produksjon av tritium for kjernevåpen, med en løsning som i Watts Bar i USA, selv om de fortsatt skal produsere noe strøm. Det viser hvor kort avstanden er mellom sivil kjernekraft og militære kjernevåpen.^{iv}

Japan fikk selvfølgelig et stort tilbakeslag som følge av Fukushima-katastrofen i 2011. Fram til våren 2024 hadde landet 12 reaktorer i drift. Senere er ytterligere to tatt ut. 25 reaktorer søker om lisenser etter nye strengere regler som kom etter Fukushima. Gjennomsnittsalderen er høy; 33,5 år. Et nytt alvorlig jordskjelv i 2024 påvirket den nedstengte Shika Nuclear Power Station uten å påføre kraftverket direkte skade. Derimot ble det store skader i området rundt kraftstasjonen, som ville fått betydning hvis reaktoren hadde vært i drift. Videre oppstart og drift av Japans gamle reaktorer er svært omstridt og rettsaker pågår i rettsapparatet.

Kanada har 19 reaktorer i drift. Men dette er dyr strøm for et land hvor to tredjedeler av strømmen kommer fra langt billigere vann- og vindkraft. Myndighetene i Kanada har visjoner om en tredobling av kapasiteten framover mot 2070. I India økte strømproduksjonen fra vindkraft 50 ganger mellom 2003 og 2023, mens solar-produksjonen økte med 85 % 2020-2023. I dag er India verdens 3. største på solar.

Av andre land som først og fremst har satset på kjernekraft er Russland først i klassen, med 36 reaktorer i drift, mens 11 er nedstengt. På tross av dette er Russland mer avhengig av fossil strømproduksjon enn nesten alle andre land. Solar- og vindproduksjon er i praksis ikke-eksisterende. Aldersgjennomsnittet på russiske reaktorer er 31,5 år, hvilket gjør det vanskelig å forstå hvordan man skal innfri målsettingen om at 25 % av strømproduksjonen skal komme fra

kjernekraftverk. Russland er verdens største eksportør av kjernekraft og kjernekraftverk til Bangladesh, Kina, India, Egypt, Iran, Slovakia og Tyrkia. Russland er også en viktig eksportør av naturlig- og anriket uran til land som USA, Ungarn og Frankrike.

Kina har pr. 2024 57 reaktorer i drift med en kapasitet på 54 GW, som produserte 406,5 TWh. Det var 4,9 % av total strømproduksjon. Det finnes planer om å ekspandere dette til 18 % i 2060, som er en nedjustering av ambisjonene. Gjennomsnittsalderen på landets 57 reaktorer er bare 10,4 år. 27 reaktorer er under bygging. En ny reaktor ble koblet til strømmettet i 2024.

Hvis vi ser på situasjonen i hele verden, så har det i de siste 20 åra vært 102 oppstarter og 104 nedstengninger av reaktorer. 49 av de nye har kommet i Kina. Utenom Kina har det vært en reduksjon på 51 enheter. Kina produserer nå mer strøm fra kjernekraft enn Frankrike, og er nr. to i verden etter USA. Men likevel investerer Kina nå langt mer i solar-produksjon enn i kjernekraft. Tallene viser store endringer i bransjen etter 1985, det året atomkrafta virkelig skjøt fart og fortsatte påfølgende år, på tross av Tsjernobyl-katastrofen i 1986. Fukushima i 2011 betydde et veiskille.

I Sverige har man startet opp igjen et tidligere avsluttet prosjekt, men finansieringen av prosjektet er ennå ikke avklart. Det tyske prosjektet ble vedtatt avsluttet i 2000 etter mange år med demonstrasjoner og politiske diskusjoner, men først satt i verk som følge av Fukushima. Hovedtrenden nå er at det globalt gjøres større investeringer i "non-hydro renewables", særlig solar, enn i kjernekraft og at denne tendensen vil fortsette, på tross av at ingen av disse energiformene dominerer verdens energiproduksjon. I Kina investeres det i 2024 om lag 200 ganger så mye i solar som i kjernekraft. Solar gir svært mange fordeler for et land som Kina. Den er fleksibel og kan lett tilpasses annen virksomhet og den krever ikke enorme investeringer. Til sammenlikning har det amerikanske Vogtle-kjernekraftanlegget til nå kostet over 36 milliarder amerikanske dollar, - altså over 300 milliarder kroner. Og det er ennå ikke ferdig. Denne typen overskridelser er ikke ukjent i bransjen, som World Nuclear Association opplyser om kraftverket Hinkley Point C i Somerset.

Kostnadene for prosjektet utvikler seg til astronomiske proposjoner.^v Etter at Institute for Energy Economics and Financial Analysis, IEEFA, i september 2024 publiserte en studie som advarte om at introduksjon av kjernekraft i Australia vil øke strømkostnadene drastisk, kom *Financial Times* nylig med en rapport om at det prosjekterte kjernekraftverket Sizewell C vil koste 40 milliarder britiske pund og nær fordoble strømregningene i landet. Rapporten er basert på faktiske overskridelser ved det finske Olkiluoto 3, det franske Flamanville 3, det britiske Hinkley Point C, de amerikanske

Vogtle 3 og 4 og NuScale SMR, samt en planlagt utvidelse av Dukovany-kraftverket i Tsjekkia.^{vi}

Det er lite offentligheten får vite om problemene i kjernekraftindustrien. Vi skal se på noen slike problemer under. Industriereierne rapporterer ytterst sjelden om problemer ved sine anlegg.^{vii} I det hele tatt er det mye hemmelighet i denne bransjen, som er så spesiell ikke bare på grunn av et nærmest bunnløst pengesluk, men også på grunn av et tidsperspektiv for bygging og lisensiering som overgår alt verden har sett med tidligere teknologier. Det har ikke bare å gjøre med at kjernekraftindustrien er nært knyttet til forsvarsindustrien - for ikke å snakke om at den har et følsomt forhold til forsikringsbransjen. Men det har også å gjøre med at kjernekraften rent teknisk er helt annerledes enn all annen teknologi, selv om hver enkel bit av den er enkel og kjent nok.

Her snakker vi om hva som styrer menneskelig arbeid med kjernekraften og hvordan forholdet mellom mennesket og maskin nødvendigvis må foregå, av tekniske årsaker. Vi skal se nærmere på dette og starter med et provokativt spørsmål.

Hvorfor fisjonskraftverk er risikable

Verden har visst lenge at kjernekraft er risikofylt. En rekke tilfeller har demonstrert det for oss. Vi snakker om noe annet enn bare tilfeldige uhell. Vi må spørre om det kan ha å gjøre med hvordan energiproduksjonen skjer. For å besvare dette må vi først se på et forenklet bilde av hvordan slike reaktorer er konstruert.

La oss tenke oss en reaktor som produserer energi ved å spalte atomkjerne av uranisotopen ²³⁵U. Når en atomkjerne av denne isotopen spaltes, frigjøres energi som vi kan måle enten som

varme, det vi kaller termisk energi, i form av stråling som vi kan måle med termometer, geigerteller eller andre apparater. Vi kan også registrere denne energien i partikkelform, som elektroner og som nye "lettere" grunnstoffer, som vi kan påvise gjennom enkle kjemiske eksperimenter. Vi velger å framstille prosessen slik, for å vise hvor enkel den er. Men hvis vi analyserer alle sider av den, så vil vi oppdage at den i virkeligheten også er ganske komplisert. Det er imidlertid ikke så viktig for oss i denne sammenheng.

I vårt tankeeksperiment må vi også velge å se bort fra alle tekniske utfordringer med å rigge til en slik reaktor, det amerikanerne kalte en "uranstabel" og tyskerne kalte en "uranmaskin". Vi forutsetter videre at vi har tilstrekkelig mengde med uran, det vi kan kalle "kritisk masse". Videre

vet vi at det finnes flere isotoper av uran. Det vi er på utkikk etter er altså isotopen ^{235}U fordi atomkjerner av denne isotopen lar seg spalte. Men de er ganske sjeldne. Det er faktisk bare 0,72 % av denne isotopen i naturlig uran. Som nevnt finnes det flere andre isotoper av uran. Den viktigste er ^{238}U , såkalt "tungt" uran. Den utgjør 99,284% av naturlig uran. Den lar seg ikke spalte slik ^{235}U gjør.

Av dette forstår vi at en spaltning av ^{235}U ikke er så enkelt å få til. For det første må vi ha såpass mye av uranet at ^{235}U -isotopen finnes i tilstrekkelig mengde, altså det vi kalte "kritisk masse". Denne massen må også ha en tilstrekkelig tetthet. Vi kan gjøre det litt enklere hvis vi manipulerer denne kritiske massen av uranet litt - anriker den - og øker antallet atomer av isotopen ^{235}U i forhold til ^{238}U . Det er komplisert å få til, selv om det lar seg gjøre. Men dette kan vi se bort fra i vår sammenheng, fordi det ikke vil endre vårt prinsipielle resonnement.

For å komme videre i tankegangen må vi introdusere nøytronet, en elementærpartikkel som har fått denne betegnelsen fordi den ikke har noen elektromagnetisk ladning utad. Fordi en slik partikkel er nøytral vil den kunne trenge inn i et atom av isotopen ^{235}U og treffe atomkjernen og splitte den. For å starte det hele må vi først skaffe til veie et slikt nøytron og "dytte" det inn i uranmassen og få det til å treffe et atom av ^{235}U . Det er vanlig å bruke en ekstern nøytronkilde ved oppstart av en kjernereaktor og ved utløsning av kjernevåpen. Men i virkeligheten ville det gå helt av seg selv fordi vi alltid er omgitt av frie nøytroner. Det er fordi noen atomer av radioaktive grunnstoffer som uran og plutonium alltid fisjonere spontant. Kjernen til et ^{235}U -atom inneholder 143 nøytroner og 92 protoner. Når vårt nøytron treffer denne atomkjernen under helt bestemte forutsetninger, så vil kjernen kunne bli spaltet og en mengde nye "frie" nøytroner vil bli resultatet.

Hvor mange? Vel, ikke så mange som 143. Men mange nok til at vi kan forstå at hvis mange nok av disse nøytronene hver for seg ville treffe og spalte et nytt ^{235}U -atom, og hver av disse igjen fortsetter prosessen, så har vi i gang noe som vi kan kalle en kjedereaksjon. Hver eneste spaltning frigjør en termisk effekt som lar seg måle, selv om den er liten i forhold til temperaturer vi vanligvis omgås med. Hvis dette skjer ikke bare noen tusener, men millioner ganger i løpet av uhyre kort tid, så forstå vi at her har vi en gigantisk varmeovn. Det er nettopp dette som er den grunnleggende prosessen i en spaltningsbasert kjernereaktor som er spesialkonstruert for å produsere damp til å drive en stor dynamo, en strømgenerator.

En slik kjedereaksjon er ikke lett å stoppe. Det hjelper ikke å blokkere tilførselen av nøytroner utenfra. For prosessen underholder seg selv med et stadig økende antall nøytroner. Men her ligger også både et potensiale for enorm energiproduksjon og en risiko for at det hele kommer ut av kontroll. Og hva skjer da? Da vil varmeproduksjonen øke og øke inntil det blir så varmt at alt smelter, og i siste instans brenne seg gjennom reaktorgulvet og ned i grunnen, eller fordamper opp i atmosfæren.

Dette er et sterkt forenklet hendelsesforløp. For lenge før noe slikt vil skje, så vil ulike passive, naturlige og "selvregulerende" forhold bremse temperaturøkningen og virkningen av

moderatoren vil bli redusert, og et økende antall nøytroner blir "spist" av ^{238}U . Varmeøkningen vil også bremses noe fordi tettheten av uranet vil minke når varmen øker. Hvis slike selvregulerende faktorer likevel ikke er tilstrekkelig brems på prosessen, vil ødeleggende gasekspløsjoner oppstå fordi ulike deler av reaktorkonstruksjonen smelter sammen. Hva gjør man for å stabilisere en slik kjedereaksjon, slik at den ikke kommer ut av kontroll? Dette er nøkkelproblemet for alle

konstruktører av kjernereaktorer.

Hva en kjernereaktor består av

La oss først se litt mer på hva en kjernekraftreaktor består av. Innerst har vi selve reaktorkjernen, som består av uranstaver i tilstrekkelig antall, vanligvis samlet i en reaktortank. Rundt uranbrensløpet sirkulerer en væske som bremser ned nøytronenes hastighet, en såkalt moderator. Så har vi kjølevæske som også sirkulerer rundt i brenselstanken. I lett- og tungtvannsreaktorer er det samme type stoff. Det betyr i praksis nesten alle kjernekraftreaktorer som er i drift i dag og som vil være i drift i nærmeste framtid. Det finnes også eldre reaktorer med grafitt som moderator i kombinasjon med CO₂ eller lett vann som kjølemiddel, og det finnes mer eksperimentelle typer. Men felles for alle er at de for å betjene strømproduksjonen må ha en varmeveksler koblet til kjølevæsken. Der blir varmen transformert over til vanddamp som ledes i et eget rørsystem til en dampturbin, som igjen driver en strømgenerator.

For å kontrollere nøytronstrømmene i reaktoren trenges kontrollstaver av et stoff som lett absorberer nøytroner. Vanlig er for eksempel kadmium og bor. En vanlig reaktor kan ha 200-300 slike kontrollstaver, som kan skyves ut og inn i rør som er plassert i brensløpet. Når kontrollstavene er helt inne, så oppstår ingen kjedereaksjon og en pågående kjedereaksjon vil stoppe. Når stavene trekkes ut, øker nøytronstrømmen inntil den underholder seg selv. Kontrollstavene er nøkkelen til en aktiv drift av reaktoren og til justering av problemet med forsinkede nøytroner. Moderne reaktorer skal ha tilbakekoblingsmekanismer ved driftsavvik. Kontrollstavene løser imidlertid ikke problemene med restvarme selv om man stenger ned reaktoren. Slike kontrollstaver er drevet av elektriske, hydrauliske motorer. De tar vanligvis elektrisitet fra strømmettet utenfra, eller fra egne, dieseldrevne strømgeneratorer. Slike strømgeneratorer betjener også kjølevannet til reaktoren, dampledningene fram til turbinen og kjølebassengene for brukt brensel, som alle må ha. Det er også påkrevd og vanlig å ha reservegeneratorer, i fall noe skulle skje.

Selv om altså reaktoren er en stor strømprodusent, er alle mulige tekniske funksjoner rundt og i den vanligvis avhengig av strømtilførsel fra det eksterne strømmettet. I tillegg til å drive kjølvannssystemet, så betjener de eksterne pumpene også basseng for nedkjøling av brukt brensel. Slike basseng må man ha fordi brukte brensløpstaver utstråler varme i lang tid. Hvis det blir for lite vann i bassengene vil de brukte brensløstaverne smelte ned og forårsake store skader.

En reaktor er en komplisert innretning, med massevis av tekniske komponenter, kilometervis av kabler og rørledninger, ventiler, måleinstrumenter og kontrollsystemer. En mengde eksterne forhold som strømtilførsel, vanntilførsel, tilgang på våkent, kvalifisert personell må til for å holde styr på at anlegget ikke løper løpsk. For nettopp dette med faren for å løpe løpsk er det som gjør denne oppgaven så spesiell. Utfordringen med en reaktor som er i drift er ikke å holde den igang, men å hindre at den ikke utvikler seg til noe uønsket. Og - når det med jevne mellomrom er nødvendig - å kunne stenge den ned i ordnede former. Mens et vanlig bål dør ut hvis det ikke tilføres tilstrekkelig energi, er det her motsatt: Det krever en aktiv kraftinnsats for å stoppe.

Ytre hendinger i en motsatt verden

La oss se litt nærmere på hva dette innebærer. Alle kjenner til problemene med å tenne et bål når forholda er ugunstige. Det krever omtanke og påpasselighet. Og hvis forholda er svært ugunstige, så krever det ekstra mye innsats. Hvis du ikke forer ilden med ny ved, så dør den ubønnhørlig ut. Vi kan utvide resonnetet: Dette gjelder all energiproduksjon basert på vanlig forbrenning av fossile brennstoff. Bilen, båten, flyet stopper hvis det ikke stadig tilføres mer energi utenfra. Hvis man ikke foretar seg noe, så slokker det ubønnhørlig. Dette er noe alle vet.

Med en kjernereaktor er det altså helt omvendt. Hvis du ikke foretar deg nødvendige ting, så kan "bålet" løpe løpsk. Når en vanlig motor går tom for drivstoff, så får det ikke andre konsekvenser enn at bilen stopper, selv om det kan være kjedelig nok. Med en kjernereaktor kan konsekvensene derimot bli katastrofale hvis noe svikter og man ikke klarer å stoppe den.

"Noe" i vår sammenheng her kan være et utall av forhold. I kjernereaktorenes historie er det

for eksempel ikke uvanlig at det oppstår svikt i den ekstreme strømtilførselen. Altså som følge av noe så vanlig som et strømbrudd. I så fall kan mange funksjoner falle ut. Et klassisk tilfelle skjedde ved Browns Ferry ved Tennessee River, Alabama i 1975, da man ved inspeksjon av kabelgjennomføringene for eksterntstrømmen, rett og slett utløste brann i kablene. Strømmen til alle funksjoner kortsluttet og simpelthen forsvant. Reaktoren måtte stenges et helt år for å bytte kabler. Men reaktoren ble reddet.

Hvis det samtidig med strømsvikt fra det eksterne nettet oppstår problemer knyttet til vedlikehold av strømgeneratorene ved verket, kan man være ille ute. En slik dobbel svikt kan høres usannsynlig ut. Men i virkeligheten er det slike kombinasjoner av svikt, som har utøst de største katastrofene i kjernekraftshistorien. Nedsmeltningen ved Three Mile Island, Harrisburg i 1979, startet med at en enkel vannpumpe sviktet. Dermed sluttet også kjølinga og systemet mistet evnen til å bli kvitt varme. Dermed økte vanntrykket voldsomt, det ble problemer med vibrasjoner. Så sviktet en trykkregulator tank, fordi en ventil ikke fungerte som den skulle, med en påfølgende hydrogeneksplosjon. Resultatet ble nedsmelting av reaktoren. Det tok ti år å rydde opp.

Ved Forsmark 1 i Sverige i 2006 var det ikke svikt i den eksterne strømtilførselen som var problemet, men at en elektriker hadde klart å kortslutte en strømkrets på anlegget i forbindelse med vanlig vedlikeholdsarbeid. Resultatet ble ikke bare at kjølepumpene falt ut, men at også tre backup-systemer falt ut. Det hadde man ikke trodd var mulig. I 22 minutter steg temperaturen faretruende, inntil man klarte å rigge til en ny ekstern strømtilførsel, så katastrofen ble unngått.

I Fukushima var det et jordskjelv med påfølgende tsunami som avbrøt den eksterne strømtilførselen. Vannet fosset inn i anlegget. Dermed ble dieselgeneratorene som skulle betjene pumpesystemene ødelagt. Man mistet lyset og instrumentkontrollen. Hydrogeneksplosjoner ødela konstruksjonen. Temperaturøkingen førte til nedsmeltning og full katastrofe på alle tenkelige måter. Området er fortsatt idag et katastrofeområde, som kommer til å påvirke livene til hundretusener mennesker i overskuelig framtid.

Problemer med eksterntstrømmen kan oppstå på grunn av forhold som ikke hadde noe med selve reaktoren å gjøre. Ved Vogtle kjernekraftverk i Burke County, Georgia, oppsto det i 1990 en faretruende situasjon da en truck ved et uhell kjørte inn i et bryterskap for det vanlige 230-voltanlegget. En bæresøyle for ei rørgate for reservestømmen til en av enhetene ble også skadet av trucken og rør med tilknytning til kjøleanlegget falt ned. Resultatet ble en ukontrollert temperaturstigning i reaktoren. Det varte i 36 minutter før man fikk igang strømforsyningen fra det eksterne nettet, og situasjonen ble reddet.

I virkeligheten har langt de fleste tilfellene av slike uhell ikke noe med tilstanden i selve urankjernen å gjøre. Ved Tsjernobyl i Ukraina i 1986 skulle man gjennomføre en planlagt test for å finne ut hvor stor effekt man kunne få ved stor eller maksimal utbrenning. Derfor hadde man skrudd av nødsystemer og alarmer. Helt uten forvarsel kilte en kontrollstav seg fast og lot seg ikke løsne. Så steg temperaturen som igjen utløste to store eksplosjoner. Reaktorkjernen ble ødelagt og taket av bygningen ble revet av. Mange døde og mange ble strålingssyke. Mange fikk skjoldbruskkjertelkreft og andre kreftformer. Det ble opprettet en 30 km sone rundt reaktoren der alle landsbyer ble demolert og begravet, mens beboerne ble flyttet. Men det var nabolandet Belarus som fikk det meste av det radioaktive nedfallet. Regntunge skyer på vei mot Moskva ble behandlet med kjemiske stoff og radioaktivt regn forurensset en fjerdedel av Belarus. Landsbyer 300 og 400 km fra reaktoren ble evakuerte. Ennå i dag er det vanskelig å ta inn over seg omfanget og virkningene av katastrofen og det er stor uenighet om helsevirkningene av den og hvordan man skal beregne antallet ofre.

Materialspekt og risiko

En annen type risiko og problem som er intimt knyttet til kjernekraftens historie, har med materialvalg og bruk av kjemiske stoffer å gjøre. Ved kjernekraftverket Davis-Besse ved Oak Harbor, i Ottawa County, Ohio, oppsto faktisk to av de farligste atomhendingene i USA siden 1979. Den alvorligste av disse var i 2002, da man oppdaget at et reaktorlokk av ståltypen "Alloy 600" var nesten totalt spist opp av korrosjon. Kombinasjonen av billig stålqualität og syre innblandet i kjølevannet var trolig årsaken. Men reaktoren hadde allerede i 1977 problemer med en trykkventil

og i 1985 med en fødevannspumpe. I 1998 ødela en tornado kontrollinstrumentene og alarmen gikk mens reaktoren ble stengt ned. Det viste seg da dessuten at nødgeneratorene på anlegget også sviktet. Man lyktes med å koble seg til det eksterne strømmettet, slik at ytterligere skade ble unngått. De amerikanske atommyndighetene har lenge forsøkt å stenge ned anlegget. Men det er fortsatt i drift. Også i Frankrike er det funnet materialsvikt i stålkonstruksjonene i flere kjernekraftverk.

Felles for alle disse tilfellene er at det ikke var kjernereaksjonen i seg selv som skapte problemene, men det vi kan kalle *ytre forhold* rundt reaktoren. Og fordi en kraftreaktor er en enormt komplisert konstruksjon, så er det en rekke ytre forhold vi må ta hensyn til som kan bli forvandlet til *trusler*. Det er hele tiden nødvendig å håndtere potensielle trusler fordi de vil inntreffe hyppigere og med større konsekvenser i en slik selvgående maskin og ikke bare dø hen, som i en vanlig maskin.

For å unngå at slike tilfældigheter eller uforutsette hendinger kan forvandle reaktoren fra å være en gavmild energiprodusent til et destruktivt monster, er det nødvendig med en stadig pågående og vaksom arbeidsinnsats. En hvilken som helst vanlig maskin ville dø hen i samme situasjon. På tross av alle mulige sikkerhetsforanstaltninger, tilsier disse strukturelle problemene sammen med erfaringene fra bransjen, at det bare er et spørsmål om tid før en ny, stor atomkatastrofe vil inntreffe, slik den tidligere lederen av den amerikanske Nuclear Regulatory Commission, NRC (tidligere Atomic Energy Commission, AEC) Gregory B. Jaczko skriver i boka *Confessions of a Rogue Nuclear Regulator* (2019).

Satsingene på Small Modular Reactor, SMR

De store problemene knyttet til kostnadene i bransjen med de eksisterende kjernekraftverkene som verden har sett til nå, har ført til et ønske om å lage kjernekraft på en liten, billig og fleksibel skala, en såkalt "Small Modular Reactor", SMR. Den bærende idéen er at man kunne prefabrikkere komponentene i fabrikker og begrense byggetida på stedet til montering av ferdigelementer. En rekke land har startet slike utviklingsprosjekter.

Et argentinsk prosjekt kalt "Carem"^{viii} er det eldste som er kjent og beskrevet i litteraturen. Det har til nå kostet mer enn en vanlig "stor" reaktor. Etter planen skal den første Carem-reaktoren kjøres igang i 2028, noe som det er all grunn til å undre seg om er mulig. Det er mer enn usikkert hva dette prosjektet vil lede til, om det er noe i det hele tatt. Myndighetene i Kanada har også vist stor interesse for SMR og finansiert forskjellige prosjekter og utredninger. Men stort mer enn å finne aktuelle steder for bygging har ikke skjedd, og interessen for SMR er åpenbart sterkt motivert av ønske om å svekke den sterke miljøbevegelsen i de kanadiske provinsene. To modelltyper Westinghouse "eVinci", "ARC-100" og 5 MW Micro Modular Reactor, MMR, er imidlertid nevnt som interessante, sammen med noen andre typemodeller "XE-100 SMR".

Kina har vist liten interesse for SMR, men har som nevnt satset på et program for store, gammeldagse reaktorer. De har imidlertid også et SMR-prosjekt, som er basert på en gass-kjølt SMR-type med betegnelsen "HTR-PM" og et trykkvannsdesign, "ACP-100". Kineserne har jobbet systematisk med begge prosjekttypene i flere år med sikte på å få dem operasjonelle innen utgangen på 2026. *World Report*^{ix} konkluderer med at Kina på "kinesisk vis" neppe forventer seg noe særlig resultat av prosjektene.

Frankrike har mer enn noe annet land satset på kjernekraft og det er å vente en tilsvarende satsing på SMR. I 2019 satset Macron \$ 500 millioner på det såkalte "Nuward" og et liknende beløp på en ny type innovative reaktorer med lukket forbrenningscyklus, med forventet byggestart i 2030. Franskmennene forhandlet med svenskene om reaktorprosjektet "Astrid". Etter innspill fra Vattenfalls, CEZ og Fortum om prisgaranti, forsvant Nuward-konseptet ut av de svenske SMR-planene. Hvilke konsekvenser dette har fått for det franske prosjektet er ikke kjent. Frankrike har nemlig tidligere allerede forkastet tre SMR-konstruksjoner ("Flexblue", "Antares" og "NP-300").

Også den indiske regjeringen har snakket mye om behovet for SMR. Samtaler har vært ført med både franske og russiske selskaper uten resultat. Indias egen atomenergikommisjon har engasjert seg i å utvikle et indisk konsept. Det er imidlertid ingenting som tyder på at dette vil føre

til noe i nær framtid. Helt annerledes er situasjonen i Russland, der man spesialiserte seg på flytende reaktorer plassert på lektere. Det vil si å bygge spesialkonstruerte lektere med kjernekraftverk påmontert. Prosjektet er kalt "KLT-40S" og er en trykkvannsreaktor. En slik lekter var ferdig allerede i 2019 og en annen i 2021. Den første er plassert ved Pevok i Tsjukota, det andre foregår i Seversk.^x Ytterligere to prosjekter er på gang som skal kobles til strømmettet i 2029. En av dem er basert på reaktorkonseptet til en atomdrevet isbryter. Alle lekterne produseres i Kina. Denne typen er beregnet til å starte i 2027 og vil i såfall være banebrytende fordi den skal bruke flytende bly som kjølevæske og uranium-plutoniumnitrid som brensel, med betegnelsen "Brest-300". Det skal være en demonstrasjonsreaktor med tanke på kunder i utlandet. I tillegg til disse typene, har Russland også inngått en avtale med Usbekistan om å bygge seks SMR med til sammen 330 MW.

Sør-Korea har også kastet seg på SMR-bølgen med en 100 MWs trykkvannsreaktor med betegnelsen "Smart". De har vært svært aktive for å selge denne typen til en rekke land, men så langt vi vet uten særlig suksess. Prisen er for høy.

Storbritannia hadde ingen egne SMR-design inntil Rolls Royce lanserte sitt 440 MW konsept, som egentlig faller utenfor definisjonen på max 300 MW. Effekten tilsier at disse reaktorene plasseres som gamle generasjon II-reaktorer. I 2023 kom atommyndighetene med noen foretrukne designer, som GE-Hitach BMRX-300, Holtec SMR-160, X-energy og andre.

I USA fortsetter industrien å hevde at SMR er framtida for kjernekraft. I juni 2024 lanserte TerraPower og Bill Gates med brask og bram et natriumbasert SMR-prosjekt, som var svært dårlig forberedt og lite gjennomtenkt, men som forutsatte offentlig finansiering. Og dyrere enn Utah Associated Municipal Power System, UAMPS med sin "NuScale" 462 MW-SMR. Det var det SMR-prosjektet som hadde kommet lengst, trolig i hele verden. Men også det er avviklet fordi det er for dyrt. I oktober 2023 avviklet X-energy også sitt prosjekt "SPAC". Et tredje prosjekt er "Kairos", også det uten suksess. På tross av disse mislykkede prosjektene som det nå finnes omlag 80 forskjellige konsepter for, det ene mer fantasifullt enn det andre, så fortsetter amerikanske myndigheter å sponse SMR-prosjekter i utlandet. Etter at den nye presidenten Donald Trump har overtatt, ser det ut til at de stadig høyere energikostnadene fra kjernekraften stimulerer utvikling i retning av å vende tilbake til gass og olje.

Ingen snarveier til trygg og billig kjernekraft

Problemet som alle disse forsøkene og for såvidt alle andre SMR-prosjekter står ovenfor, er at effekten blir for liten, sammenliknet med større reaktorer. Og dermed blir strømprisen for høy. Den kan ikke konkurrere. Dermed blir hele ideen bak SMR torpedert. Da direktøren for NuScale skulle forklare hvorfor de hadde kastet kortene, svarte han: "Hvis du oppdager at du sitter på en død hest, så hopper du av så fort du kan."^{xi}

Problemet med SMR er altså strukturelt; at den både er for liten og for stor. I tillegg er teknologien med å sette sammen ulike prefabrikerte elementer ("moduler") svært komplisert. Til sammen er dette en nesten garantert oppskrift til å mislykkes. I tillegg har ingen lyktes med å gjøre rede for botemidler for de ulempene som også en SMR-reaktor har felles med alle andre reaktorer, fordi den simpelthen er basert på en nukleær kjedereaksjon. Som alle andre reaktorer har den en dobbeltnatur; dels er den en strømprodusent, dels er den en våpenprodusent. En "normal" reaktor vil produsere nok plutonium til 20-30 kjernevåpen på ett år. En SMR vil også produsere nok plutonium til flere kjernevåpen i året. Hvis vi tenker oss at vi tillater over 100 SMR-reaktorer i norske kommuner, så vil det medføre tonnevis av plutonium, enten det nå blir liggende som brukt brensel på inngjerdede reaktorområder rundt i kommunene, i geologiske deponier ett eller flere steder eller blir bearbeidet til våpenplutonium i en eller flere plutoniumfabrikker. Det er et stort ansvar å sette

igang dette, ikke bare for vårt samfunn, men for tusenvis av generasjoner framover. Plutonium ²³⁹Pu har en halveringstid på 24 110 år. Hvem vet hvem som styrer i landet om mange tusen år?

Den engelske forfatteren Mary Shelley skrev i 1818 den berømte "gotiske" romanen *Frankenstein; eller den moderne Prometheus*, om hvordan et menneskeskapt monster tar makta

over menneskene som hadde skapt ham. Det var en uhyggelig visjon i ei tid med enorme teknologiske og samfunnsmessige nyskapninger. Men Mary Shelley tok feil. Maskinene på hennes tid var basert på fossil forbrenning. Men med en kjernefysisk, spaltningsbasert atomreaktor er det faktisk mulig å forestille seg at Shelleys visjonære *frykt* er realistisk, slik Tsjernobyl, Fukushima og Three Mile Island har demonstrert kan skje. Det er grunn god nok til å forstå at det hviler en risiko over en kjernekraftteknologi som menneskesamfunnene ennå ikke har vist seg tilstrekkelige modne til å mestre. Det gjelder ikke bare ute i verden, men også for små og større norske kommuner. Det bør være mer enn tilstrekkelig grunn til å avvise den i vår tid.

Oslo 17. mars 2025

Lars Borgersrud, historiker

-
- i <https://www.worldnuclearreport.org/World-Nuclear-Industry-Status-Report-2024-1046>
 - ii Borgersrud, Lars: "Notat om kjernekraft", *Gnist* 4 2024.
 - iii *World Nuclear Power Status Report 2024* regner at det nøyaktige tallet pr. desember 2024 er 412.
 - iv Når det gjelder produksjonen av tritium, se <https://www.ffi.no/publikasjoner/arkiv/tritium-production>
 - v <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom>
 - vi https://ieefa.org/resources/new-uk-data-sends-nuclear-warning-australia?utm_campaign=Weekly
 - vii Gregory B. Jaczko var i en årrekke sjef for den amerikanske Nuclear Regulatory Commission (tidligere Atomic Energy Commission, AEC). I boka *Confessions of a Rogue Nuclear Regulator* (2019) forteller han om hvor vanskelig det var å samarbeide med den amerikanske atomindustrien med å sikre de amerikanske atomanleggene.
 - viii Central Argentina de Elementos Modulares.
 - ix WNISR 2024: 350
 - x Seversk ligger i Tomsk oblast. Det er en lukket by som i alle år har hatt sentral betydning i det sovjetiske og russiske atomvåpenprosjektet.
 - xi WNISR 2024: 365